CLIO-MQM ワークショップ報告（2010.5.24-25）
――マクロな物体の量子状態を観測する――

宗　宮　健太郎

要　旨

マクロな物体の量子計測（MQM）を実現し、我々の住む古典的な世界が、電子や光子の存在する量子的な世界とどう違うのか、その疑問を解明しようという試みが世界各地で行われている。日本の低温干渉計 CLIO は、その中でも大きなマスを用い、MQM を実現しようとしている研究である。今回、CLIO を中心として世界 7 カ国から先進的研究を遂行する科学者を集め、早稲田大学高等研でワークショップを開催した。とても有意義な議論が交わされた 2 日間の模様をここに報告する。

CLIO-MQM Workshop
ー Challenges to see quantum behavior of a macroscopic object ー

Kentaro Somiya

Abstract

To clarify the difference between classical objects like human beings and quantum objects like photon or electron is one of the most important themes in Quantum Mechanics. The first face-to-face workshop on this theme with people working for gravitational-wave detectors was held at the Waseda Institute for Advanced Study on May 24th and 25th and this is the report of the workshop.

はじめに

古典論の世界では、物体の位置は一意に決めることができると考えられているが、量子論の世界では、物体の位置は確率的な重ね合わせとして表される。ヤングのスリット実験における光子のように、異なる状態間での干渉が生じるなど、古典的には説明のつかない現象が量子論に従って起こっている。光子のようなミクロな対象ではなく、猫のようなマクロな物体でも同じことが起こるのか、というパラドックスを示したのが有名な「シュレディンガーの猫」である。マクロな物体は量子的な揺らぎよりも、環境からの影響による熱的な揺らぎが大きく、量子論的振る舞いを観測することは難しいが、近年の計測技術の発展により、「マクロな物体の量子計測（Macroscopic Quantum Measurement = MQM）」が現実味を帯びてきた。光干渉計型重力波検出器は 10^-19 メートル級の感度を実現し、キログラムスケールの鏡を量子状態に追い込むまで、あと 1 桁ほどというところまで迫った。さらには、もっと小さな対象を量子状態に閉じ込める実験も各地で行なわれている。ピコグラムスケールからキログラムスケールまで、幅広い対象について、さまざまな手法で研究が進められている。

さまざまな実験の中でも期待が高いのが、1.8kg の鏡を 20K 度まで冷却して光干渉計を組む、CLIO 実験である。日本の第二世代低温重力波検出器 LCGT のプロトタイプである CLIO は、そのデザイン感度を実現すれば、熱揺らぎを量子揺らぎの 2 分の 1 程度まで下げることが可能であり、鏡の量子的振る舞いを観測することができると考えられる。

今回のワークショップは、東大宇宙線研を中心と

したCLIOの実験グループと、カリフォルニア工科大を中心としたMQMの理論グループが中心となり、同じ目的をもつ研究者を世界各地から募って開かれることとなったものである。私（宗宮）は両方に所属し、理論実験両面で研究をしているものとして、発起人となり、ワークショップのコーディネーターを担当した。参加者は米国、ドイツ、ロシア、フランス、オーストラリア、イギリス、日本の大学・研究所から33名となった。東大宇宙線研と早稲田高等研の共催という形で、高等研大セミナー室において5月24、25日の2日間に渡って行なわれた。開催に際して、宇宙線研の菊地さん、高等研の宇山さん、小松さん、須田さんには、招待講演者の手配や会場の準備などで多大なご協力をいただいたので、感謝の意を表したい。

量子限界到達へ

初日の午前は、小型鏡を用いて標準量子限界（Standard Quantum Limit = SQL）到達を目指す実験グループに、現状報告をしてもらい、問題点の認識の共有と知見の交換を行なった。

Mapping the micro-oscillator experiments in the world　*K.Somiya（WIAS）*

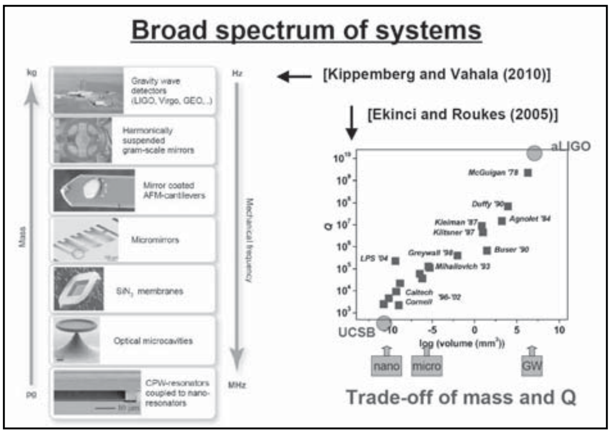

図１　様々な大きさの実験の紹介（左）と、対象のサイズとQ値の関係（右）。

ピコグラムスケールのNEMS（Nano-electromechanical systems）からキログラムの鏡を用いる重力波検出器まで、幅広いスケールの物体を対象に、量子計測を目指す実験が行なわれている。量子計測を阻む最大の要因は、振動子の熱揺らぎである。量子計測を実現するには、精密測定による運動量の反発が見えやすくなるよう、軽い物体を用いるのがよい。しかし図1に示すように、熱揺らぎの指標となるQ値は物体が小さいほど低い、すなわち熱揺らぎを導入しやすいということも分かっており、量子計測のために最適な材質を見つけることが、実験成功への大きなポイントとなる。また、振動子の共振周波数が高いほど1量子あたりのエネルギーが高くなり、同じ熱エネルギーと比較した場合に量子数（occupation number）が減るという利点がある。軽量であるほど振動子の共振周波数は高くなる傾向にあり、熱揺らぎの低さとともに重要な要素となる。

重力波検出器タイプの量子計測実験では、測定対象である鏡は振り子に吊られている。振り子はQ値が10^7ほどのファイバーでできているが、振り子の復元力はファイバーの弾性より強い重力なので、Q値はさらに100-1000倍になる。そのため振り子の熱雑音は十分低くなり、量子計測を阻むのはむしろ鏡の熱雑音ということになる。また、測定周波数は振り子の共振より高い周波数で最適なものを選ぶこととなる。

このように軽量レジームと重量レジームは異なる。ファイバーの太さの製造限界が20ミクロン程度だとすると、10gを境に振り子の利点はなくなっていく。それより軽い測定対象については振動子の冷却が必要となる。それより重い対象についても、振り子の熱雑音は低くなるが、反射面の熱雑音などが問題となり、量子計測は難しくなっていく。

2010年3月にUCSBから発表された論文で、NEMSを用いて量子計測を実現した実験結果が報告された。測定対象は極小のピエゾのドラムモードで、ジョセフソン電流と結合させ、ピエゾの開閉という2状態の量子的重ね合わせを実現している。実験の成功の大きなポイントはドラムモードという高周波のモードを測定対象としたことで、板バネ型のNEMS実験よりもoccupation numberで数倍よい結果を出した。ただし、重心位置を測っているわけではないので、得られる知見に条件がつく。UCSB以外のグループとしては、彼らの実験から得られたものと得られないものを理解し、今後どのような実験を進めていくべきかの戦略が必要となる。

Micro-oscillator experiment at NAO　*T. Mori（Univ of Tokyo）et al.*

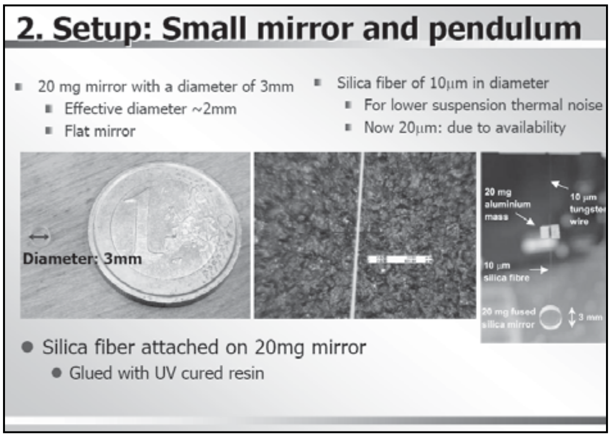

図 2　NAO 実験で用いられている 20mg の石英鏡と石英ファイバーの様子（森氏のスライドより）。

三鷹の国立天文台では、第二世代重力波検出器の感度を制限すると考えられている量子雑音について研究するために、20mg の石英鏡を振り子に吊り、量子的輻射圧雑音を測定する実験が行なわれている。これまでに行なわれてきた MIT や ANU の実験が 1g、現在計画されている AEI の実験が 100g の鏡を用いるので、20mg はそれらと比べてもかなり小さい。SQL に到達するのは厳しいが、1kHz で 5 倍ほどの余裕をもって、これまで誰も実現したことのない量子的輻射圧雑音の観測が可能な設計となっている。デザイン感度に到達した後は、balanced homodyne detector を用いて量子非破壊計測を行ない、1kHz で 6dB ほど輻射圧雑音を軽減する予定である。

現在は振り子の Q 値を測定している段階で、それについて MIT の Corbit 博士から、真空に入れてから数日間は Q 値が徐々に上がっていくというコメントがあった。また、古典的な輻射圧による共振器の角度不安定性についても議論が交わされた。

Nano-gram membrane experiment at AEI

K.Yamamoto（AEI）et al.

ドイツのマックスプランク研究所（AEI）では、シリコンでできた薄膜（メンブレーン）の量子計測を目指して実験が行なわれている。メンブレーンは 1.5mm × 1.5mm の正方形で薄さは 75nm で、アクチュエイターのついたフレームに貼られている。実効的な質量は 100ng で、共振周波数は 75kHz である。現在は Q 値と共振周波数の測定が行なわれている。メンブレーンのいくつかのモードが縮退する

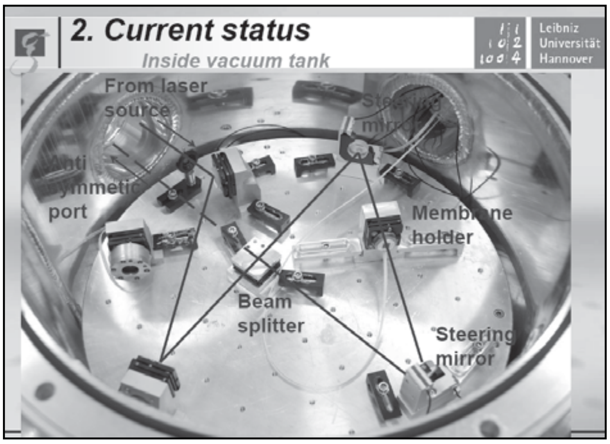

図 3　AEI 実験では薄さ 75nm のメンブレーンを共振器内に組み込み、その変位を測定している（山元博士のスライドより）。

ことや、共振器内パワーを変えるとメンブレーンの共振周波数が変化することが検証された。

また、この実験では、メンブレーンにハイパワーを照射すると焼きついてしまうことが懸念されるため、マイケルソン干渉計とサニャック干渉計を組み合わせ、パワーリサイクリングとシグナルリサイクリングを導入した、独特な干渉計構造を採用している。

10m interferometer at AEI

S.Gossler（AEI）et al.

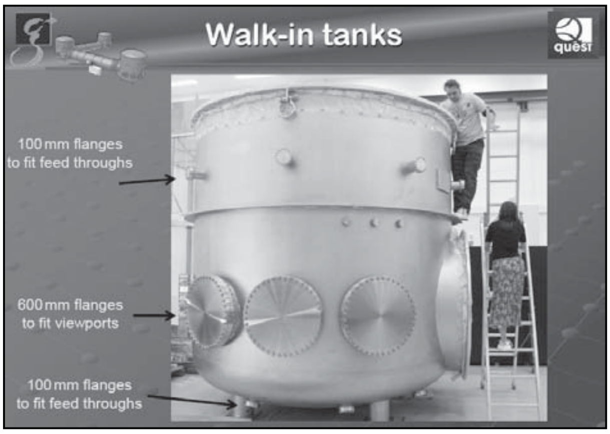

図 4　AEI 10m 実験で用いる巨大な真空槽の様子（ゴスラー博士のスライドより）。

ドイツのマックスプランク研究所（AEI）では、10m の大型干渉計を用いて量子計測を目指す実験も始まっている。測定対象は 100g の石英鏡である。製造過程での許容値を加味して、先述した重量レジームの最適解である 10g より少し重くしている。

それでも常温では鏡の反射膜の熱雑音がSQLより大きくなってしまうが、10m実験では、Khalili共振器と呼ばれる技術を導入して熱雑音を軽減する。これは1枚の高反射率鏡の替わりに、反共振に制御された光共振器を用いるというアイデアで、反射膜の枚数を実質的に下げることで、熱雑音を軽減できる。デザイン感度を実現すれば、100Hz付近でSQLの1/3ほどまで古典雑音を下げることが可能となる。

Laser cooling of a micro-resonator at LKB

T.Briant（UPMC）et al.

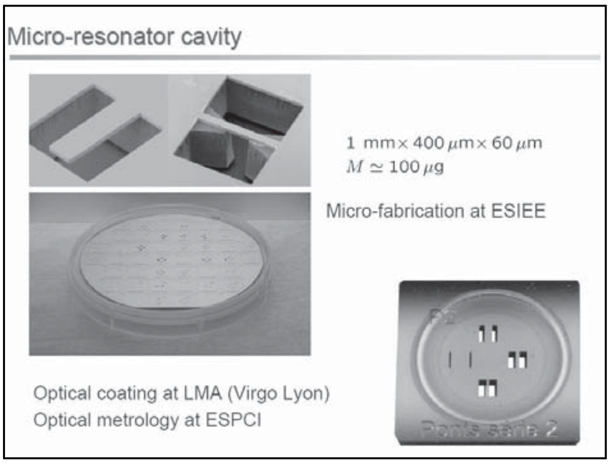

図5　ALKBのマイクロ振動子の様子（Briant博士のスライドより）

フランスのピエール&マリーキュリー大学（UPMC）・カスラーブロッセル研究所（LKB）ではさまざまな量子計測研究が進められてきた。2006年には100μgの鏡を用いたレーザークーリング実験がNature誌に発表されている。その後、cryogenicシステムを導入し、鏡の熱雑音の低下を確認している。最近では、振動子の共振を隣の縦モードの空間高次モード周波数に合わせることで、高い精度のレーザークーリングを実現する実験、熱雑音の低い特殊構造の振動子の開発、格子状に孔を空けた高反射率メンブレーンの開発などを行なっている。

MQM理論

初日の午後は、SQL到達後にどうやって量子計測を行なうか、などの疑問に答えるべく、理論研究グループに分かりやすく解説してもらうとともに、最新の研究内容を紹介してもらった。

Macroscopic Quantum Mechanics in Opto-mechanical Devices

H.Miao（UWA）

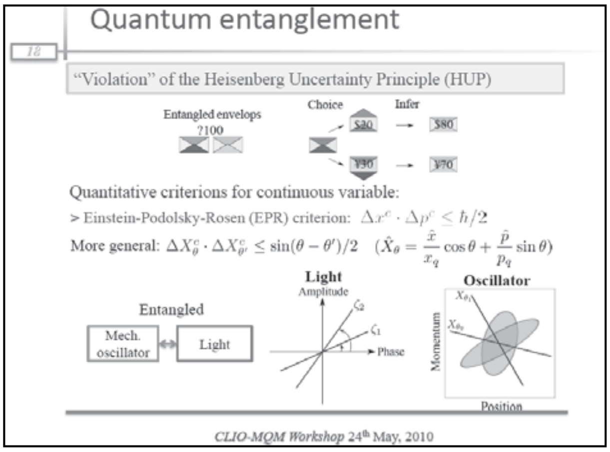

図6　筒の中身が円かドルかという量子的重ね合わせを理論的に説明（Miao氏のスライドより）

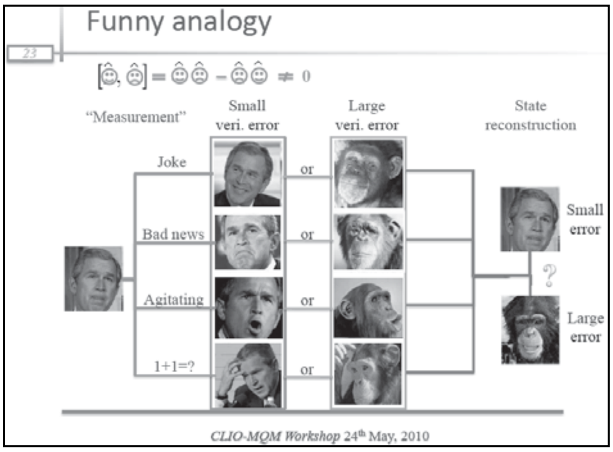

図7　Verificationステージでブッシュ前米国大統領を復元する様子（Miao氏のスライドより）。

Miao氏には、量子力学の基本的なレビューを含め、MQMに関する1時間半のレクチャーをしてもらった。

マクロな物体の量子状態はpreparationステージとverificationステージの2段階に分けて行なわれる。マクロな物体は熱的に励起された状態にあり、測定によって量子状態を回復しなければならない。計算してみると、古典雑音レベルがSQLより低い周波数があることが、量子状態回復の条件となり、その周波数帯に合わせてフィルターを設計することになる。これがpreparationステージである。次に、用意した状態が量子的であることを証明しなければならない。Preparationステージ完了時点で測定対

象をリリースし、位置 x と運動量 p の covariance matrix を実験的に求める。これが verification ステージである。

古典雑音が存在しない場合、回復した状態は純粋状態と呼ばれる完全な量子状態になり、古典雑音があると混合状態になり、それが SQL より大きいとほぼ古典状態となる。熱力学的に説明すれば、振動子が常温の環境とおよそ絶対零度の光とエネルギーの交換をしているということで、光との相互作用が強いほど、振動子の温度は下がり、量子状態に近づくということである。

Preparation ステージと verification ステージの間に時間をおき、回復した量子状態の振る舞いを見ると、徐々に古典状態へと遷移していくのが分かる。これを熱的デコヒーレンスと呼ぶ。振動子の周波数や古典雑音のスペクトルによってデコヒーレンスの速さが異なる。また、ダークフリンジにロックした Michelson 干渉計で、2 つのエンドミラーの同相と差動の動きを測定して量子状態を回復すると、エンドミラーの位置は量子的にエンタングルした状態にあることになる。エンタングルの度合いを測ることにより、系がどれだけ量子的なのかを知ることができる。

Towards mechanical non-Gaussian states with optical interferometers

S.Danilishin（Moscow State）et al.

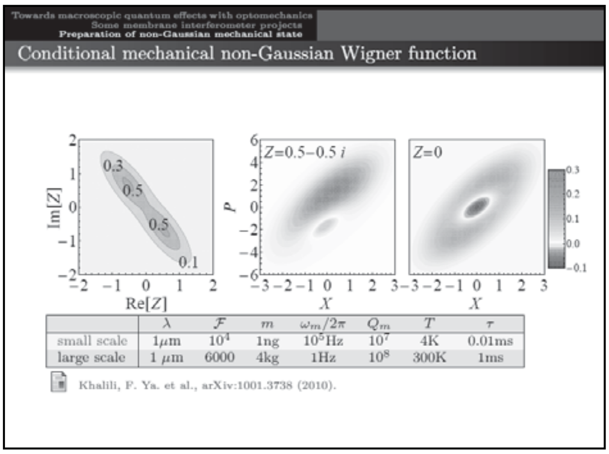

図 8　Non-Gaussian 状態（Danilishin 助教授のスライドより）。

線形系において量子ガウス状態を復元しても、その振る舞いは統計論に従う古典的な振る舞いとあまり変わらない。量子状態特有の振る舞いを見るためには、やはり非線形系あるいは非ガウス状態を用意する必要がある。フォック状態のような、負のヴィグナー分布を含む状態を作り出すことで、その条件を満たすことができる。フォック状態は 1 光子と鏡を相互作用させることで作り出せるが、相互作用時間が長くなければならない。高いフィネスの共振器を組み、軽くて共振周波数の低い対象を測定することが必要になる。例えばメンブレーンを用いるとして、重さが 50ng、共振周波数が 100kHz であるので、非線形性を確認するのに必要なフィネスは 10^8 のオーダーになる。1 光子を用いる代わりに、周波数依存性のあるスクイーズ場を入射することでも、フォック状態を生成することが可能である。MIT で開発しているポンデロモーティブスクイーザーが有望である。

Up-converter regime in MQM experiments

F.Khalili（Moscow State）

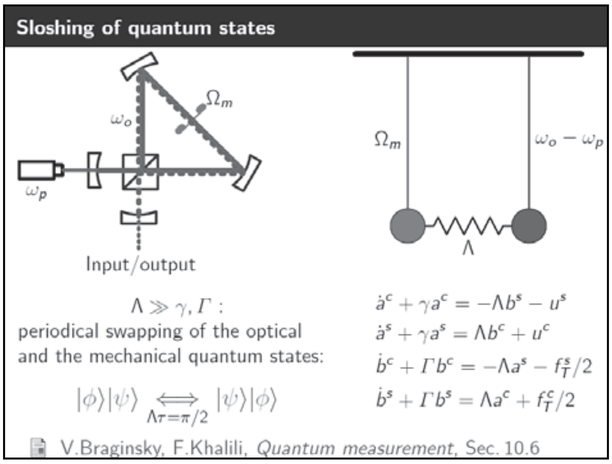

図 9　量子状態のスロッシング（Khalili 教授のスライドより）。

これまで MQM の手法は、測定対象の情報を取得し、最適フィルターを用いて量子状態を復元、その後、測定対象が本当に量子状態にあるのかを、反復的な測定で確認するものであった。ファンシーな量子状態を作り出すには、測定対象を非線形系に組み込む必要があった。ここで提案するのは、スロッシングを用いる手法で、ファンシーな量子状態は光学的に用意し、それを測定対象にコピーするというものである。この手法はマイクロ波を用いて UCSB の実験でも採用されている。ここでは、AEI のメンブレーン実験でスロッシングを用いることを想定し、基底状態以下に冷却できることを示す。スロッ

シングはこのような機械的スクイーズ状態の実現だけでなく、量子メモリーや量子テレポーテーションにも応用することができる。

重力波検出器開発と MQM 研究

２日目は、重力波検出器開発に近い立場で量子計測研究を行なっている人たちに、研究内容を報告してもらった。MIT の研究グループは、米国の重力波検出器 LIGO のサイエンスコラボレーションにおいて、量子雑音研究の先駆け的存在である。CLIO は、低温の振り子型測定装置という、最先端の技術を搭載した干渉計で、量子計測の分野でも注目されている。そして最後に、カルテク MQM 理論研究グループのトップである Chen 助教授に今後の展望を語ってもらった。

Squeezing and radiation pressure experiments at MIT　*T.Corbitt（MIT）et al.*

MIT グループでは LIGO のサポートもあり、量子雑音および量子計測に関する様々な実験が遂行されてきた。

図 10 の上段は、LIGO 本体を用いたレーザークーリング実験の様子を示している。LIGO でもっとも感度がよい 140Hz 付近がユニティゲインとなるように制御系を組み、そこでの位相余裕を変化させると、バーチャルな振動子が実現できる。実効的な温度に換算すると 1.4 μ K まで冷却できていることが分かる。量子数を計算すると 200 ほどである。

図 10 の中段は、MIT で行なわれている 1g 鏡を用いた干渉計である。この干渉計では、二重光バネによるシステムの安定化実験や、負の g-factor を導入した角度不安定性の解決など、第二世代重力波検出器で有用な技術が多く開発されてきた。現在は、懸架系の改良を行っており、感度は量子的輻射圧雑音の測定まであと数倍というところまで来ている。感度を制限しているのは、ファイバーを接着している接着剤の熱揺らぎで、理論予測に合致したきれいな熱雑音のスペクトルが確認されている。

図 10 の下段は、SQL 到達を目標に新しく作成したマイクロ振動子実験の様子である。共振周波数は 250Hz と低く、光バネで共振を持ち上げるという、第二世代重力波検出器と同様のレジームを採用できるよう設計されている。

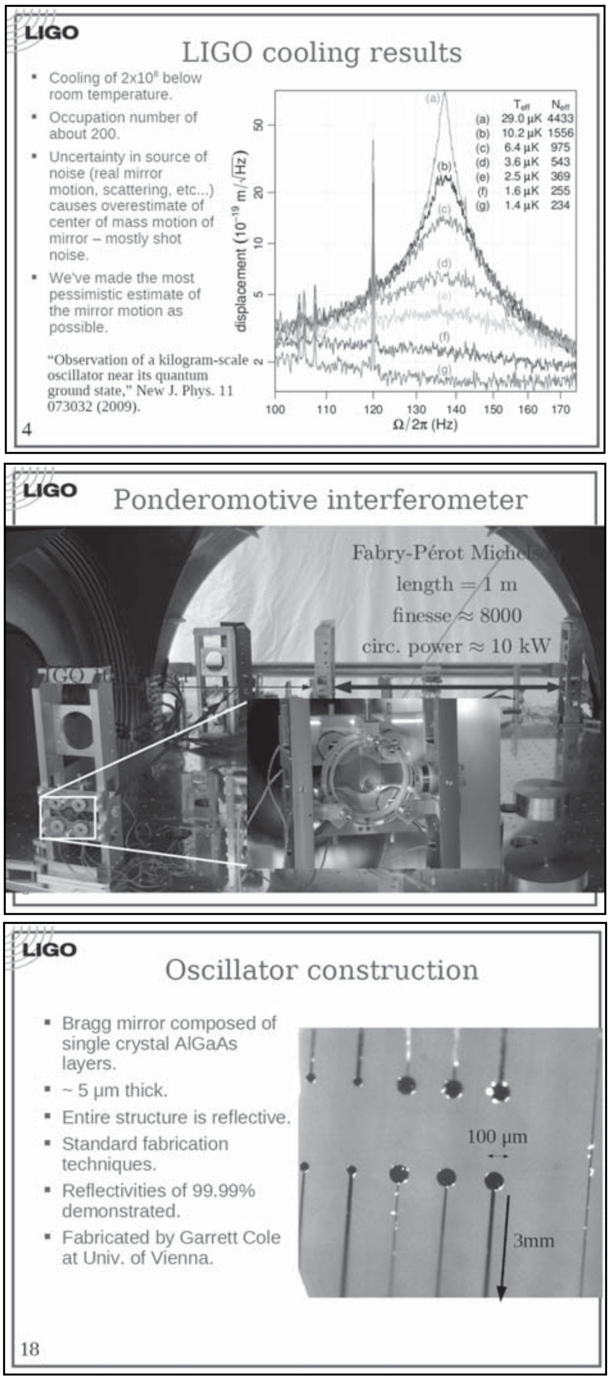

図 10　MIT グループで行なわれた様々な実験の様子（Corbitt 氏のスライドより）。

CLIO Experiments and Reconstruction for MQM　*S.Miyoki（ICRR）et al.*

CLIO は、日本の第二世代重力波検出器 LCGT のプロトタイプである。常温における感度は、懸架系および鏡の熱雑音で制限されるレベルに到達し、冷凍機を用いた低温化により熱雑音が低減することを確認、LCGT のプロトタイプとしての役割を果たすことができた。次なる目標は SQL への到達である。

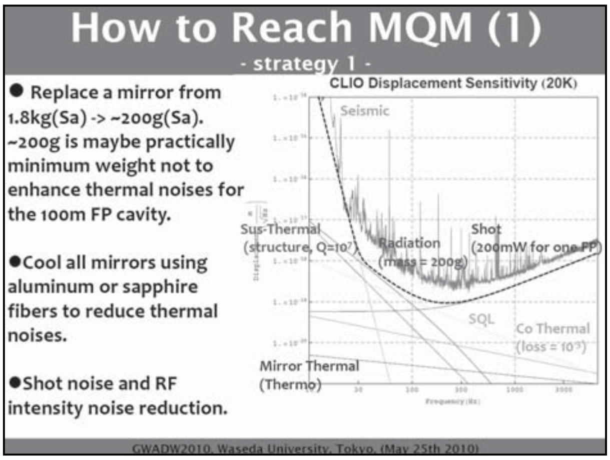

図 11　現在の CLIO の感度と、鏡を軽量化した場合の予想感度（三代木博士のスライドより）。

そのために、以下のような改善策を実行する予定である。まず現在は 4 つある鏡のうち 2 つだけが冷却されているが、これを全ての鏡で実行する。次に、現在はアルミのファイバーで吊られているが、これをサファイアファイバーに交換する。また、ショットノイズを下げるために、光を分割してフォトデテクタを複数用いる。さらに、SQL を下げるため、現在 1.8kg であるサファイア鏡を 200g のものに交換する。これらの改善策を施せば、SQL に到達することができると考えられる。

After we reached the SQL

Y.Chen（Caltech）.

重力波検出器と MQM は、目標は異なるものの、その実現へ向けて同じような手法を用いることが多い。第二世代重力波検出器で導入される光バネは、重力波信号の増幅を目的としているが、MQM ではテストマスのトラッピングとクーリングのために重要な役割を担う。量子非破壊計測は、重力波では周波数ドメインで感度向上のために導入され、MQM では時間ドメインで量子状態のトモグラフィを得るために用いられる。感度向上のために協力して努力していくことが重要である。

MQM 研究で何が分かるのであろうか。まずはハイゼンベルグの不確定性原理の検証、そして量子的エンタングルメント状態の生成と検証。さらなるトピックとしては、まだ推測の域を出ないと前置きした上で、重力デコヒーレンスの検証が挙げられる。異なる状態間で重力子がやりとりされ、波動関数が

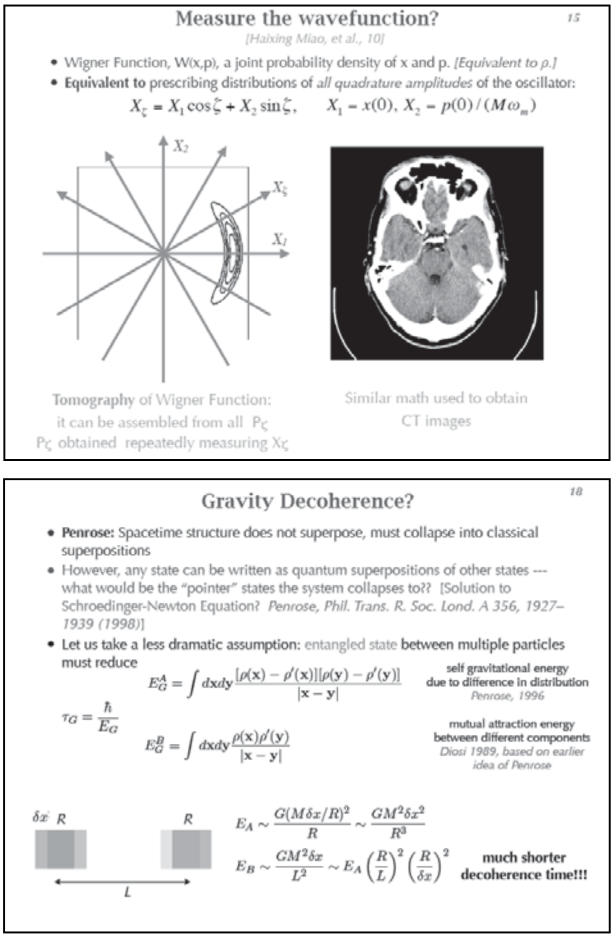

図 12　量子状態のトモグラフィ（上段）と重力デコヒーレンスに関する考察（下段）（Chen 助教授のスライドより）。

収縮するというペンローズの仮説である。さらに、シュレディンガーの猫状態のような、極度に非ガウス状態を生成し、量子的振る舞いを検証することについても、研究を進めていく。

最後に

2 日間のワークショップは盛況のうちに幕を閉じた。学会のように発表をメインにするよりも、ディスカッションに重点を置こうということで、発表後に 10〜30 分とかなり長めの質疑時間をとったが、それでも時間が足りなくなるほど議論が盛り上がった。今回は京都で行なわれた重力波国際学会 GWADW と時期を合わせることで、多数の研究者の参加が実現できた。次回はまた GWADW の開催に合わせて 2 年後くらいにやろう、ということで意見がまとまり、解散となった。

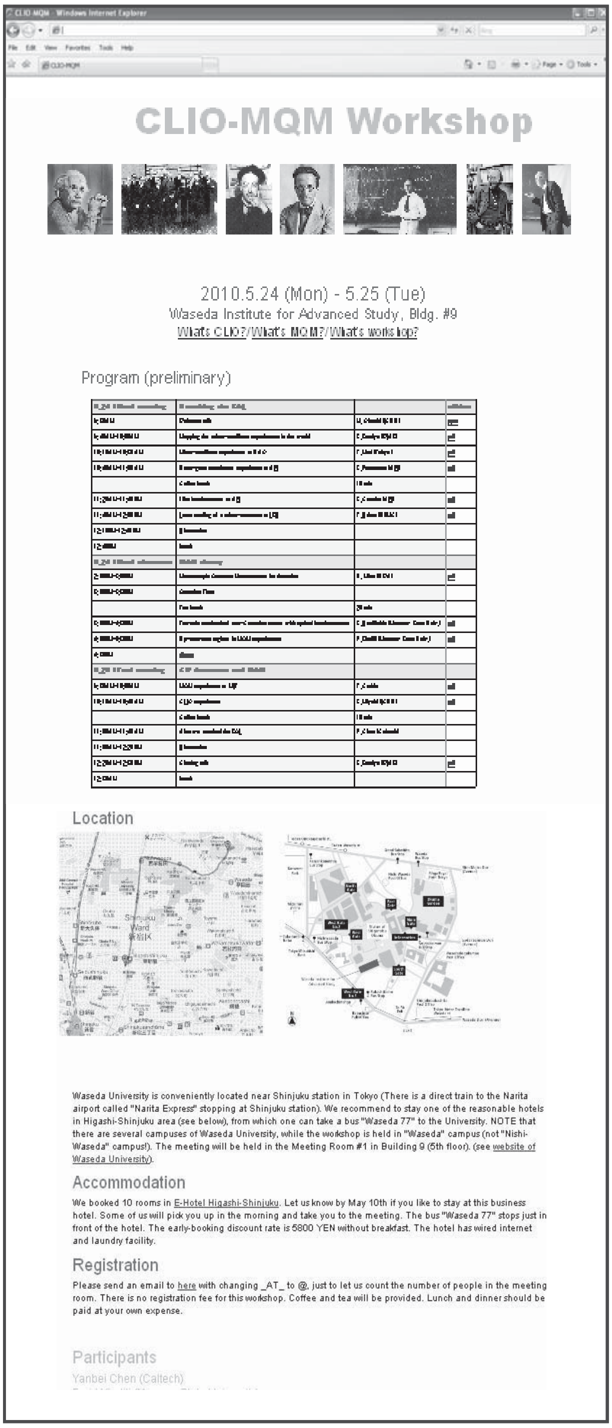

図 13　ワークショップホームページ。

【参加者リスト】

Yanbei Chen（Caltech）
Farid Khalili（Moscow State University）
Stefan Danilishin（Moscow State University）
Haixing Miao（University of Western Australia）
Thomas Corbitt（MIT）
Stefan Gossler（AEI Hannover）
Kazuhiro Yamamoto（AEI Hannover）
Tristan Briant（Universit? Pierre et Marie Curie）
Koji Arai（Caltech）
Andreas Freise（University of Birmingham）
Stefan Hild（University of Glasgow）
Chunnong Zhao（University of Western Australia）
Warren Johnson（Louisiana State University）
Shihori Sakata（OCA）; Skype によるリモート参加
Seiji Kawamura（NAOJ）
Stefan Ballmer（NAOJ）
Ryutaro Takahashi（NAOJ）
Kazuhiro Agatsuma（NAOJ）
Norikatsu Mio（Univ. of Tokyo, Frontier Sciences）
Noriaki Ohmae（Univ. of Tokyo, Frontier Sciences）
Takumi Mori（Univ. of Tokyo, Frontier Sciences）
Yoichi Aso（University of Tokyo）
Nobuyuki Matsumoto（University of Tokyo）
Yuta Michimura（University of Tokyo）
Erina Nishida（Ochanomizu University）
Toshikazu Suzuki（KEK）
Atsushi Nishizawa（University of Kyoto）
Akio Hosoya（Tokyo Institute of Technology）
Yuki Susa（Tokyo Institute of Technology）
Masatake Ohashi（ICRR）
Shinji Miyoki（ICRR）
Takashi Uchiyama（ICRR）
Osamu Miyakawa（ICRR）
Kentaro Somiya（WIAS）　※順不同です